

無人有翼往環機用燃焼器の材料損傷と耐久性評価に関する研究

著者	黒田 行郎
号	2049
発行年	1997
URL	http://hdl.handle.net/10097/7322

氏 名	くろ た ゆき お 黒 田 行 郎
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学 位 授 与 年 月 日	平 成 1 0 年 3 月 2 5 日
学位授与の根拠法規	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 機械知能工学専攻
学 位 論 文 題 目	無人有翼往還機用燃焼器の材料損傷と耐久性評価に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 庄子 哲雄
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 庄子 哲雄 東北大学教授 坂 真澄 東北大学教授 近藤 達男 東北大学教授 升谷 五郎

論 文 内 容 要 旨

本論文では、傾斜機能材料の概念をHOP Eの軌道制御用エンジンに適用し、実環境場におけるエンジンの耐久性と性能について実証した。試験には実機形状の1/10サブスケールモデルの燃焼器を試作し、貯蔵性推進薬NT O/MMHを用いて評価した。第2次試作の燃焼器には、耐久性の向上を狙って減圧プラズマ溶射と共析電鍍法を共用した完全F GM組成の遮熱層を適用した。また、高性能化のためフィルム冷却率が0%の噴射器を製作し、試作したF GM燃焼器との構成で高空性能試験並びに地上での余寿命評価試験を実施した。余寿命評価試験では、選定した非破壊検査法により燃焼器の損傷を評価した。更に、遮熱コーティング層の寿命向上を狙って試作したレーザー改質材の耐久性に関する評価試験を実施し熱応力解析との比較・検討を行なった。本論文は、以下の内容で6章により構成されている。

第1章では、本研究の背景、燃焼器コーティング評価の現状、本研究の意義および目的と構成について示した。

第2章では、燃焼器スロート部の熱負荷に対応した熱応力場で最適なF GM組成を設計し、燃焼器コーティング層のF GM組成がこれまではP S Z含有率で0%~24.5%が限度であったものを、減圧プラズマ溶射法と共析電鍍法を併用して断面の組成を、初めて完全形状のF GMにする燃焼器を試作した。

第3章では、試作したF GM燃焼器とフィルム冷却率0%の高性能噴射器を組合わせて、実環境場での高空性能試験と余寿命評価試験を実施し、以下の結論を得た。

(1) 余寿命評価試験では、試作したエンジンは従来型のフィルム冷却式エンジンに比べて燃焼器熱負荷の上昇が少なく耐久性の向上が認められた。本試験により、F GMの優れた耐熱性を立証することができた。

(2) 開口比 $\varepsilon = 286$ の高膨張ノズルを用いた高空性能試験では、比推力 I_{spv} は燃焼時間 $t = 100$ 秒で 318 秒 ($\eta C^* = 96.8\%$) の高性能が得られた。これは、 $\varepsilon = 300$ 、 $t = 150$ 秒 (定常状態) において $I_{spv} = 319$ 秒に相当する。この結果は、従来型フィルム冷却式エンジン ($F_c = 23\%$) に比べて $8 \sim 9$ 秒増に当たり、NTO/MMH 推進系としては、これまでに無い高性能エンジンが実現できた。図1に、得られたエンジン性能を従来型のフィルム冷却式エンジンの性能と比較し示した。

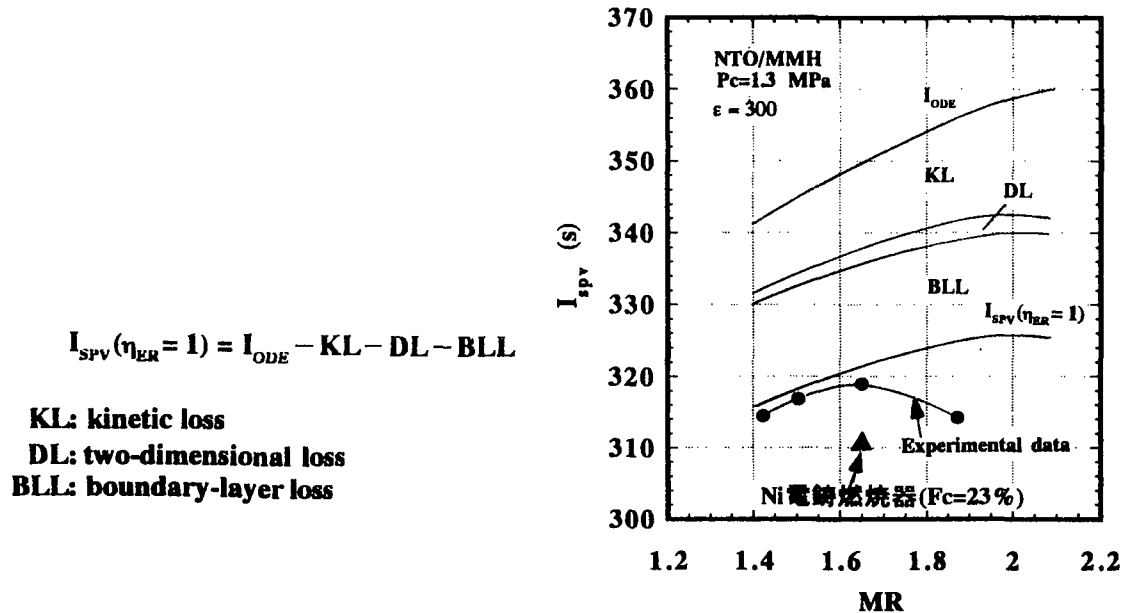


図1 エンジン性能

(3) 第1次試作の燃焼器では、噴射器部入口から燃焼器平行部にかけて噴流に対応する位置で損傷が観察されたが、遮熱層を完全FGM組成にすることにより損傷が抑えられることが確認された。

第4章では、余寿命評価試験において燃焼器の非破壊検査を行ない燃焼器の損傷を評価した。その結果、以下の知見が得られた。

(1) 二液燃料を用いたエンジンに分光計測法を適用した結果、燃焼着火直後に燃焼生成物に含まれる発光スペクトルのピークが観察され、燃焼器の損傷が着火直後に進行することが確認された。このような損傷は燃焼器特有のものであるため、寿命向上のためには着火時の熱衝撃を考慮した設計を行うことが必要である。

(2) 第2次試作の燃焼器では、燃焼器平行部の損傷が改善されたが、スロート部の損傷が想定された試験サイクルよりも早く進行した。スロート部の切断検査では、スロート部のFGM組成が一部で不完全であることが示され、これがスロート部損傷の原因と推定された。この結果から判断すると、実機型の燃焼器製作には安全性を考慮してスロート部を模擬した試料での製作条件の最適化を図る評価ステップを取入れることが必要と考えられる。

(3) 燃焼器の遮熱層に対応する模擬試料を製作し、遮熱層の厚みをI・S法で検査した結果、これまでに無い高抵抗のPSZ/Ni系の膜厚とインピーダンスの関係が得られた。本試験から、燃焼器膜厚の薄肉化に対する寿命予測の評価結果が得られる可能性が示された。

第5章では、遮熱コーティング層の耐久性向上のため試料表面をレーザー改質し、燃焼ガス加熱場において評価試験を行なった。また、FGM試料に対応するモデルで熱応力解析を行ない、比較検討して以下の知見と結論を得た。

(1) レーザー改質材の評価試験では遮熱コーティング層の一部で薄肉化が進行するが、燃焼器の最終寿命である遮熱層と母材の層間剥離に対しては、抑制効果のあることが示唆された。

(2) レーザー改質により導入する縦亀裂深さを適切に制御して、遮熱コーティング層表面における半径方向応力及び周方向応力と、FGM/Ni基板界面の試料外周端面の軸方向応力を大幅に減少出来ることが認められた。

これらの結果から、レーザー改質皮膜の優れた特性を立証することができた。

第6章は結論であり、第2章から第5章までの結果をまとめ、FGM燃焼器の設計・製作、エンジンの性能評価結果、余寿命評価結果、損傷評価結果および燃焼器模擬試料の燃焼加熱試験結果について示した。

論文審査の結果の要旨

宇宙往還機の軌道制御用エンジンは、極めて過酷な熱負荷環境にさらされ、同時に高性能が要求され優れた余寿命耐久性ならびに高空性能が不可欠である。

本論文は、軌道制御用エンジンについて実機形状の1/10サブスケールモデルで、減圧プラズマ溶射と共析電鍍法を共用した傾斜機能遮熱層を有する燃焼器を試作し、その高空性能と耐久性について検討を行ったもので全編6章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、1/10サブスケールモデルの燃焼器スロート部の熱負荷に対応した熱応力場に最適な傾斜組成を設計し、燃焼器コーティング層の断面が完全傾斜機能組成の燃焼器を設計・試作している。

第3章では、試作した傾斜組成燃焼器と性能向上のためのフィルム冷却率0%の高性能噴射器を組合わせて実環境場での高空性能と余寿命を評価している。試作された燃焼器は、従来型フィルム冷却式エンジンに比して優れた性能を示し、また燃焼器熱負荷の上昇が少なく耐久性の向上が見られている。これらは、燃焼器開発上重要な知見である。

第4章では、余寿命評価試験において燃焼器の非破壊検査を行い、燃焼器の損傷評価を行っている。エンジン燃焼ガスについての分光計測法によれば、燃焼着火直後に燃焼器の損傷が進行すること、第2次試作燃焼器においては、スロート部の損傷が早期に進行しており、これは傾斜組成が一部不完全であったことに起因していることを明らかにした。さらに燃焼器内面の ZrO_2 遮熱層の厚みの非破壊計測手法の開発を行い、 ZrO_2 膜厚をインピーダンス法により非破壊的かつ定量的に計測することが可能であることを示している。これは寿命予測の上で重要な知見である。

第5章では、遮熱コーティング層の耐久性向上を目指し遮熱層表面をレーザーで改質処理を行う新しい提案を行い、燃焼ガス加熱場において評価試験を行っている。レーザー改質処理は遮熱層の剥離の抑制に極めて効果的であり、さらにレーザー改質により導入されたき裂深さを適切に制御することによりFGM/Ni基板界面において大きな応力緩和が可能であることを示している。実用上有用な知見である。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、無人有翼往還機の軌道制御用エンジンについて実機形状の1/10サブスケールモデルの燃焼器を試作し、フィルム冷却率0%の高性能噴射器の採用による高空性能の向上について耐久性の向上を遮熱コーティング層の傾斜機能化および非破壊計測の観点より検討を行ったものであり材料強度学および機械工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。